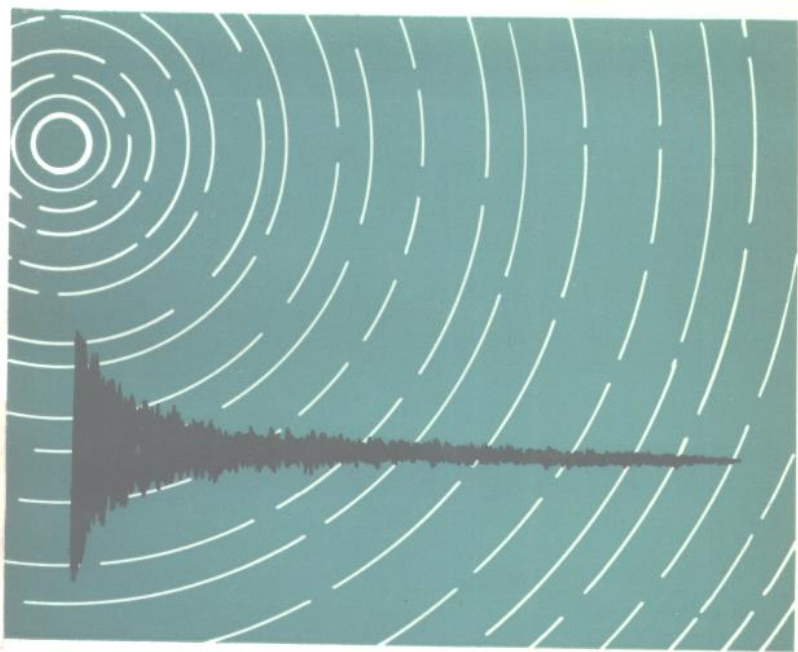


自适应有源噪声控制

——原理、算法及实现

陈克安 马远良 著



西北工业大学出版社

自适应有源噪声控制

——原理、算法及实现

陈克安 马远良 著

西北工业大学出版社

1993年7月 西安

序 言

1981年秋天，当笔者经英国文化委员会安排，在拉芙堡理工大学(Loughborough University of Technology)进修声学信号处理的时候，J.W.Roy Griffiths 教授建议我参加他和 Peter Patrick 正在开展的一项研究课题：直升机座舱噪声的自适应有源抵消。由于对自适应信号处理的浓厚兴趣，我愉快地接受了这项建议。正当我开始进行计算机仿真研究时，Peter 告诉我，他的初步研究表明，声场中的自适应抵消比单纯的电噪声的自适应抵消要困难得多，系统收敛性差，宽带抵消比只做到 5dB 左右。如果用微机芯片制成实验系统，考虑到量化和运算误差带来的损失（当时只有 Intel 8085 / 8086），恐怕得不到显著的噪声控制效果。Roy 也对这项研究的前景感到担忧，不久这项课题就终止了。尽管我的研究工作转移到自适应信号处理的其他方面，但上述问题已经给我留下了深刻的印象：在自适应有源噪声控制方面存在许多难题，它是声学 with 信号处理交叉的一个新领域，有许多工作可做。

1982年底，我去南安普敦(Southampton)大学声与振动研究所(ISVR)办事，经所长 R.G.White 教授安排，参观了他们的有源消声实验装置。那是一个用木板做成的矩形截面管道，里面安装了可沿纵轴滑动的两只扬声器和几只麦克风。实际上就是我们今天所说的一个自由度的有源消声系统。他所说的问题很复杂。从那时起至今天，该所的 P.A.Nelson 和 S.J.Elliott 等人对有源噪声控制问题进行了持续不断的研究，在消声理论分析以及有源消声的实际工程应用等方面颇有建树。

1983年本人回国以后，继续进行自适应滤波与传感器阵

列处理方面的研究工作，同时产生了利用自适应有源消声原理进行水下螺旋桨线谱噪声控制的想法。当年申请的国家自然科学基金课题：“自适应滤波与噪声抵消技术”，在次年获得批准。在基金支持下，我和研究生们一起又重新开始了关于自适应有源噪声控制问题的研究。1985年，史新华在他的硕士论文“螺旋桨噪声的自适应有源抵消研究”中，讨论了偶极声源自由场噪声控制中误差传感器置于近场区内时所需的系统补偿问题。他还用 Intel 8086 芯片研制了我们的第一个有源消声系统，碰到了系统不稳定的问题，在笔者建议下首次进行间歇 LMS 算法的实验研究。1987年，Inter-noise 国际会议论文集刊载了我们在这一领域的第一篇论文：带补偿的自适应有源消声系统。1989年，刘春跃在其硕士学位论文“自由场有源消声理论和方法研究”中，讨论了次级声源远场方向性拟合问题，得出两种次级声源阵列的优化设计方法，分析了初级声源和次级声源为点源集合时的辐射阻抗与消声效果的关系，用高速信号处理芯片 TMS3210 构成了新的试验系统，获得了比较好的试验结果。

1989年，陈克安在孙进才教授的指导和本人的帮助下完成了“局部空间自适应宽带有源消声”的硕士学位论文，对多子带并行处理宽带有源消声自适应系统进行了研究，同时改进了有关的实验系统。1992年春，陈克安在本人指导下完成了博士学位论文。该论文除了继续研究有源消声系统的数学模型，建立间歇自适应 RLS 有源消声算法外，着重对弹性结构封闭空间中声场计算及其自适应抵消问题进行了研究、提出了误差传感器最优布放的原则，并在充水圆柱腔体内进行了声模态的抵消实验。

在这期间，作者所在的西北工业大学航海工程学院及其声学工程研究所获得中国船舶工业总公司、国家自然科学基金、国家教委博士点科学基金、航空部科学基金和国防科工委科学

基金的支持，在自适应信号处理、超大规模集成电路信号处理系统和噪声控制方面进行了研究。这对我们关于自适应有源噪声控制的研究产生了很强的支撑和配合作用。

经过8年来的理论与实验研究，我们对有源噪声控制问题的认识有了很大提高，终于来到了一个新的起点，进入将理论研究的成果推向实际应用的新阶段，这与国际上有源噪声控制的发展步伐正好合拍。笔者于1991年参加在澳大利亚 Sydney 举行的 Inter-noise'91 国际会议期间以及会后到新南威尔士大学所属大学学院声学 with 振动研究所讲学时，深深感受到这一新兴学科领域已在世界范围内进入蓬勃发展的阶段。专门从事有源消声产品开发的公司已经涌现，有关学术论文大量增加，技术讲座或短训班吸引了大批科技工作者和工商界人士。但是到那时为止，国内外还没有一本这方面的学术专著出版。我们在总结8年来研究工作时，感到有必要写一本书，贡献给从事噪声控制或对此项新兴技术感兴趣的人们，适应这一科学领域的发展需要，这便是本书作者们的初衷。

正当本书完成校对，即将交付印刷时，我们了解到截止1992年底，世界上关于有源消声问题公开发表的文献已达3950篇以上。且在1992年，P.A.Nelson等在伦敦出版了世界上这方面的第一本专著——Active Control of Sound。看到该书样本后，我感到该书由浅入深，内容丰实，有许多优点，所幸的是，我们这本书的许多内容并未被前者所覆盖，有着若干独特的内容。所以我们仍有信心将拙著奉献给读者。本书尽量采用最新资料，理论分析力求简明扼要；算法的建立兼顾系统性能与实时处理的要求；提供了一些系统实现的方案、构成，以及相应的计算机仿真和原理性实验的结果，另外，本书收录了有关有源消声几乎所有最主要的文献目录，为进一步研究提供了方便。总之，我们的宗旨是理论与实际相结合。希望本书不仅对从事研究的科学工作者和高校师生，同时对从事产

品技术开发的广大工程技术人员均能有所助益。

全书共分七章。前三章讨论了基本理论，包括有源噪声控制的由来与基本概念、自由场有源噪声控制理论，以及封闭空间有源噪声控制理论。其中包含作者们建立的一些解算和设计方法，以及计算机仿真和实际的实验结果。第四、五、六章讨论了自适应算法和系统实现方法，从系统模型及其稳定性、暂态和稳态特性的分析入手，逐次深入，对自适应算法以及系统实现中的物理因素，如声延迟和声反馈的影响、误差传感器的布放、偶极源声场的近场补偿等进行了详细的讨论。本书最后一章，介绍了一些应用实例，其内容以国内外公开发表的为主。西北工业大学声学工程研究所的实验系统与本书§ 7.2 所介绍的美国 Nelson 工业公司的数字有源噪声控制器有许多相似之处，有关工作将在本书的姐妹篇(计划由孙进才和王冲撰写的另一本专著)中介绍。

最后，以本书两位著者的名义，对在长期研究工作中给予大力支持并提供有关材料的孙进才教授、史新华副教授、刘春跃高级工程师、王冲讲师和其他老师表示衷心感谢；同时对于在实验系统研制和实验过程中给予帮助的李志舜教授、赵俊渭教授、谢朝矩、沈翠羽高级工程师深表感谢。还有许多在多方面支持这项工作或参加技术问题讨论的博士生和硕士生们，这里一并向他们致谢。在国内许多兄弟单位，特别是中国科学院声学研究所马大猷教授领导的研究小组和南京大学声学研究所沙家正教授领导的研究小组，在这一领域进行了许多先进的研究工作，作者从他们的工作中受到许多启发和鼓舞，这里特向他们致谢。我们还要特别感谢在经济上给予我们支持的国家自然科学基金委员会、中国船舶工业总公司及其系统工程部以及国防科工委预先研究局，如果没有他们的支持，我们对有源噪声控制问题的研究恐怕至今仍是一片空白。笔者还要感谢英国拉芙堡理工大学 J.W.R.Griffiths 教授和南安普敦大学的

R.G.White 教授，他们都到西北工业大学进行过访问和讲学，对我们的研究工作有许多的启发和帮助。最后感谢西北工业大学出版社在本书出版过程中给予的热忱支持和合作。

马远良 谨示
1993 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 噪声的危害及其控制方法	2
1.2.1 噪声的危害及其 一般控制途径	2
1.2.2 噪声的无源控制方法	4
§ 1.3 噪声的有源控制方法	7
1.3.1 有源消声设想的提出	7
1.3.2 Olson 电子吸声器	10
1.3.3 有源消声应用的最初尝试	13
1.3.4 有源消声名词术语	14
§ 1.4 管道有源消声	15
1.4.1 单极系统	16
1.4.2 偶极系统	18
1.4.3 多极系统	19
1.4.4 “自适应”的管道有源消声系统	22
1.4.5 管道有源消声机理	24
§ 1.5 小结	25

参考文献	26
第二章 自由声场有源噪声控制	31
§ 2.1 引言	31
§ 2.2 Huygens 原理及其在有源 噪声控制中的应用	32
2.2.1 从有源噪声控制角度看 Huygens 原理	32
2.2.2 空间有源消声原理	33
§ 2.3 次级声源为单极声源集合时的最优解	36
2.3.1 连续分布声源等效为单极声源	36
2.3.2 最小辐射声功率准则下的 最优次级声源强度求解	39
2.3.3 算例	44
§ 2.4 简支矩形平板声辐射的有源控制	50
2.4.1 最优次级声源强度的求解	50
2.4.2 次级声源布放对降噪效果的影响	56
2.4.3 讨论	62
§ 2.5 窄带声场的拟合	62
2.5.1 理论分析	63
2.5.2 近似设计	65
2.5.3 计算机仿真结果	68
参考文献	71

第三章 封闭空间有源噪声控制	76
§ 3.1 引言	76
§ 3.2 封闭空间稳态声场有源噪声控制	77
3.2.1 初、次级声场	77
3.2.2 全空间时间平均声势能最小准则	79
§ 3.3 小阻尼矩形空间有源噪声控制	81
3.3.1 理论分析	81
3.3.2 低模态密度条件下 有源噪声控制的计算机仿真	84
§ 3.4 弹性结构封闭空间有源噪声控制	89
3.4.1 弹性结构封闭空间声场计算	89
3.4.2 初、次级声场计算	94
3.4.3 封闭空间有源噪声控制计算公式	99
3.4.4 弹性结构矩形空间有源噪声控制	101
3.4.5 讨论	108
3.4.6 附录	111
§ 3.5 有限长圆柱封闭空间有源噪声控制实验	115
3.5.1 引言	115
3.5.2 实验装置	116
3.5.3 封闭空间声场	117
3.5.4 声控制方式有源噪声控制实验结果	120
参考文献	123

第四章 自适应有源噪声控制系统

及滤波-X LMS 算法	131
§ 4.1 引言	131
§ 4.2 自适应滤波概述	133
4.2.1 自适应滤波器的基本原理	133
4.2.2 Widrow-Hoff LMS 算法	137
4.2.3 LMS 算法收敛系数取值范围	138
4.2.4 自适应噪声抵消器	141
§ 4.3 FLMS 算法	144
4.3.1 自适应有源噪声控制系统模型	144
4.3.2 FLMS 算法推导	149
§ 4.4 FLMS 算法的稳定条件及收敛特性	152
4.4.1 自由声场条件下的 FLMS 算法	152
4.4.2 稳定条件	153
4.4.3 收敛特性	157
4.4.4 ILMS 算法	157
§ 4.5 FLMS 算法稳态特性分析	159
4.5.1 FLMS 算法稳态特性	159
4.5.2 算例	162
§ 4.6 FLMS 算法的实现	166
4.6.1 误差通道传递函数估计误差的影响	166
4.6.2 误差通道离线自适应建模	170

4.6.3	时延估计	171
4.6.4	误差通道在线自适应建模	172
4.6.5	FLMS 算法实验	174
§ 4.7	多通道自适应有源噪声	
	控制系统性能分析	177
4.7.1	多通道 AANC 系统	177
4.7.2	多通道 AANC 最陡下降算法	179
4.7.3	多通道 AANC 系统性能分析	180
4.7.4	讨论	184
4.7.5	小结	186
	参考文献	186
第五章	RLS 类及滤波-U 算法	192
§ 5.1	引言	192
§ 5.2	FRLS 算法	193
5.2.1	FRLS 算法	193
5.2.2	FRLS 算法性能分析	197
§ 5.3	IRLS 算法	201
5.3.1	算法流程	201
5.3.2	算法硬件实现讨论	204
§ 5.4	滤波-U 算法	204
5.4.1	RLMS 算法	204
5.4.2	滤波-U 算法	206

5.4.3 小结	207
参考文献	207
第六章 AANC 系统控制器与	
声场的相互作用	210
§ 6.1 引言	210
§ 6.2 AANC 的物理机制	211
6.2.1 自由声场条件下控制器	
脉冲响应的一般形式	211
6.2.2 AANC 控制器的本质	213
§ 6.3 声反馈条件下 AANC 系统的鲁棒性设计 ...	217
6.3.1 控制器传递函数表达式	217
6.3.2 控制器的设计	219
6.3.3 AANC 系统稳定性	221
§ 6.4 封闭空间 AANC 误差传感器的布放	222
6.4.1 最佳次级声源强度和最佳降噪量	223
6.4.2 封闭空间有源噪声控制的自适应实现 ...	226
6.4.3 小阻尼矩形空间误差传声器的布放	230
6.4.4 误差信号的数字内插	238
§ 6.5 偶极源噪声自适应有源控制中的近场补偿 ...	240
6.5.1 问题描述	240
6.5.2 带补偿电路的 AANC 系统	241
6.5.3 修正 LMS 算法	244

6.5.4	CAANC 系统控制器性能分析	246
6.5.5	计算机仿真结果	268
6.5.6	小结	269
	参考文献	270
第七章	自适应有源噪声控制应用实例	273
§ 7.1	概述	273
§ 7.2	自适应管道有源噪声控制	283
7.2.1	系统框图	284
7.2.2	声通道的自适应建模	285
7.2.3	系统实现	287
7.2.4	降噪结果	289
§ 7.3	螺旋桨飞机座舱自适应有源噪声控制	291
7.3.1	背景介绍	291
7.3.2	系统构成	291
7.3.3	降噪方案	294
7.3.4	降噪结果	296
§ 7.4	小结	298
	参考文献	298

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

噪声控制，是一项工程实践性和技术性都很强的工作。从策略上讲，它可从噪声源、噪声传播途径和噪声接受者三方面入手。然而，某一具体的噪声控制措施的制定，要求从噪声控制标准、经济效益、技术可行性诸方面综合平衡，以求得最佳结果。噪声控制作为一门学科，主要研究噪声的声学控制方法，诸如吸声处理、隔声、消声器、隔振、阻尼减振等的原理及其在工程中的应用。经过多年的理论研究与技术实践，这些方面已趋于成熟，在实际工作中发挥了重要作用。

然而，以上述及的几种噪声控制方法有一个共同点，就是其降噪机理在于声能的消耗是通过噪声声波与声学材料或声学结构的相互来完成作用。它属于无源或被动式控制方法，我们称为“无源”噪声控制 (Passive Noise Control)。一般说来，有源噪声控制方法对控制中高频噪声较为有效，而对低频（尤其是 200Hz 以下）噪声效果不大。并且这些方法不同程度地存在着安装维护困难、设备笨重、体积庞大等缺点。另外，有些方法的应用还依赖于降噪环境。

1933 年，德国物理学家 Paul Leug 提出的有源噪声控制 (Active Noise Control，或称为有源消声，本书将二者混用) 思想为噪声控制开辟了新的途径。它通过人为附加声源，使其发出的声波与噪声声波相消干涉来降低噪声声能。经过近 60 年的发展，有源消声在机理研究、系统实现及工程应用等方面取得了长足进展，倍受噪声控制界的重视。

本章在对噪声的危害及一般控制方法作扼要介绍之后，评价了早期（截止 80 年代中期）有源消声发展的历史和重要成果。鉴于管道有源消声研究在有源消声发展史上的重要性，本章详细介绍不同类型消声系统的机理及实现。

本章对有源消声发展的论述不仅仅是为了叙述历史，更重要的是因为早期的一些分析问题和解决问题的方法对我们今天的研究仍有着重要的指导作用，所指出的应用领域依然有现实意义。

§ 1.2 噪声的危害及其控制方法

1.2.1 噪声的危害及其一般控制途径

噪声危害最直接、最明显的表现在于对人的影响。噪声影响人们的正常生活，损伤人体听觉，影响安全生产和降低劳动生产力，严重时会引起多种疾病。噪声对人的干扰不仅与噪声的强度、频谱和持续时间等客观因素有关，而且与每个人的心理、生理状态，以及社会生活等多方面的因素有关。一般认为，噪声对人的影响主要包括以下几方面^{[1]~[3]}：

(1) 对听力的影响

人在较强噪声环境下暴露一段时间会出现听力下降的现象，但到安静的场所停留一段时间，听觉就会恢复原状，这种现象叫做暂时性听阈偏移，也叫做听觉疲劳。但是，长年累月地在强噪声环境下工作，长期不断地受强噪声的刺激，则听觉不能复原，并且会使耳感觉器官发生气质性病变，由暂时性听阈偏移变成永久性听阈偏移，造成噪声性耳聋或噪声性听力损失。

有材料表明：在 80dB(A) 以下职业性噪声暴露时，一般不致引起噪声性耳聋（但不等于不造成听力损失）；在 85dB(A)

以下，可造成轻微的听力损伤；在 85~90dB(A)之间，会造成少数人的噪声性耳聋；在 90~100dB(A)之间，造成一定数量人的噪声性耳聋；在 100dB(A)以上，造成相当数量人的噪声性耳聋。

当人们突然暴露于极其强烈的噪声环境下时（如高达 150dB），听觉器官将发生急性外伤，造成双耳完全失听。另外，日常生活中的噪声，是造成老年性耳聋的一个很重要的因素。

(2) 对健康的危害

1) 噪声作用于人的中枢神经系统，使人的基本生理过程失调，常常会引起头疼、脑胀、昏晕、耳鸣、多梦、失眠、嗜睡、心慌、记忆力减退和全身疲乏无力等临床症状。

2) 噪声可使交感神经紧张，从而出现心跳加快，心律不齐，心电图 T 波升高或缺血型改变，传导阻滞，血管痉挛、血压变化等现象。

3) 长期接触噪声，会使人们的消化机能衰退，胃功能紊乱，消化不良，食欲不振，体质减弱等。

另外，噪声对视觉器官、血液均有影响。

(3) 影响正常生活

1) 对睡眠的干扰。如果噪声是连续的，可加快由深睡到轻睡的回转，多梦，使熟睡的时间减少。如果噪声是突然的，可使人惊醒。这样，如果经常受到噪声干扰，就有可能因睡眠不足引起头昏、头痛、神经衰弱等症状。

2) 对语言、思考的干扰。

3) 对工作产生影响。噪声刺激会使人心情烦躁，分散注意力，容易疲劳，反应迟钝，因而降低工作效率。对那些要求注意力高度集中的工种，不仅影响工作进度，而且降低工作质量，容易出差错和引起事故。

噪声对人的影响是多方面的，以上列举了最主要的几项。